

广州换流站换流变压器差动保护附加闭锁功能浅析

李书勇, 张海凤, 张鹏, 汲广, 毛海鹏

(中国南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405)

摘要: 换流变压器网侧绕组出现励磁涌流或过激磁电流时, 如果换流变压器保护装置的差动保护逻辑没有被可靠闭锁, 该装置可能误动作。文章介绍广州换流站换流变压器保护装置 KBCH 130 和 7UT 513 的差动保护动作特性, 阐述它们针对励磁涌流和过激磁电流设置的附加闭锁功能; 就广州换流站同期装置 PSD (Point on Wave Switching Device) 运行异常情况下, 对一次极 1 换流变压器充电过程中发生的 KBCH 130 差动保护动作情况进行分析, 基于磁通的变化原理估算涌流最小间断时间, 用西门子波形分析软件 SIGRA 4.21 分析涌流波形间断情况, 结果认为 KBCH 130 设置的间断角定值过大, 对应的间断角附加闭锁功能失效而引起此次差动保护误动作。

关键词: 励磁涌流; 过激磁电流; 差动保护; KBCH130; 7UT 513; 换流变压器

Analysis of additional block functions of converter transformer's differential protection serving in Guangzhou converter station

LI Shu-yong, ZHANG Hai-feng, ZHANG Peng, JI Guang, MAO Hai-peng

(CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou Bureau, Guangzhou 510405, China)

Abstract: When magnetizing inrush current or excitation current occurs at the primary winding of the converter transformer, its relays would make a wrong tripping action unless the differential protection functions are blocked reliably. The differential protection characteristics of its protection devices KBCH 130 and 7UT 513 are introduced in this paper, and the additional block functions aiming at inrush current and excitation current are expatiated in detail. What's more, while the Guangzhou station's PSD (Point on Wave Switching Device) works abnormally, one differential protection tripping event taking place when the converter transformers of pole one switched on has been analyzed. Minimum gap time of the inrush current is evaluated based on the changing of flux, and the waveform is analyzed with the software SIGRA 4.21 of SIEMENS. The conclusion is proposed like this: the failed additional block function of the dead angle resulted in the mistaken tripping action for the setting value of the dead angle is too large.

Key words: inrush current; excitation current; differential protection; KBCH 130; 7UT 513; converter transformer

中图分类号: TM77 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2008)22-0093-04

0 引言

广州换流站的换流变压器是单相三绕组变压器, 绕组为两心柱两旁轭的四柱结构。广州换流站换流变保护装置的保护功能有换流变差动保护、大差动保护、高阻抗差动保护、接地过流保护、过流保护、过激磁保护和过负荷保护等。大差动保护由西门子数字式差动保护装置 7UT 513 执行, 差动保护由阿尔斯通数字式差动保护装置 KBCH 130 执行。虽然大差动保护与差动保护对应的实际保护区域不完全相同, 但是被保护对象的电气特性是一样的。这里介绍广州换流站的换流变压器保护装置 KBCH 130 和 7UT 513 的差动保护动作特性; 并结合一次

换流变充电实例重点分析其针对励磁涌流和过激磁电流的附加闭锁功能, 特别是间断角闭锁功能; 最后针对广州换流站换流变压器差动保护提出相关建议。

1 7UT 513 和 KBCH 130 差动保护特性

7UT513 和 KBCH 130 是适合单相三绕组变压器的数字保护装置。KBCH 130 有 12 路电流输入用于差动保护, 其中每路电流输入每 20 毫秒采样 40 次。

7UT513 和 KBCH 130 的差动保护动作特性很相似, 都包含比率差动保护和差动速断保护。A、B、C 三相各绕组的电流经过变比校正、相位补偿和零序校正等软件逻辑处理后, 进行差动保护算法处理。

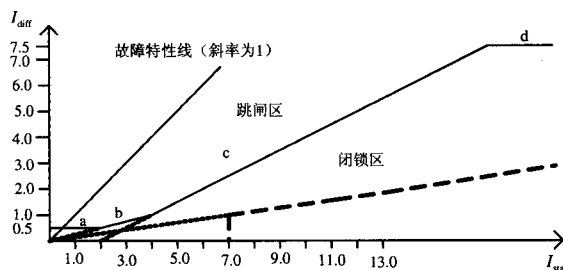


图1 7UT 513 的动作特性曲线

Fig. 1 Differential principle diagram of 7UT 513

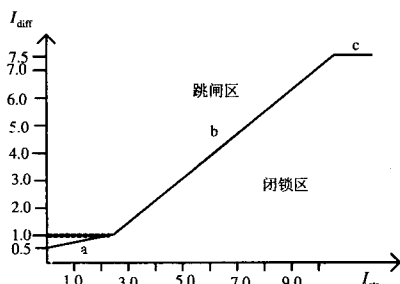


图2 KBCH 130 的动作特性曲线

Fig. 2 Differential principle diagram of KBCH 130

在 7UT 513 中, 差动电流 I_{diff} 是 I_1 , I_2 和 I_3 三电流的矢量和, 而制动电流 I_{sta} 是 I_1 , I_2 和 I_3 三电流的标量和, 其中, I_1 , I_2 和 I_3 分别表示某相对应绕组校正后的电流输入量。图 1 表示了 7UT 513 完整的动作特性。其中 a 段为差动保护的灵敏度门槛值, 其差动电流数值为 0.5 p.u., b 段是第一比率制动段, 斜率值为 0.25, c 段为第二比率制动段, 斜率系数设为 0.5。d 段为差动速断保护门槛值, 定值设为 7.5 p.u.。

KBCH 130 的动作特性如图 2, 差动电流 I_{diff} 是 I_1 , I_2 和 I_3 三电流的矢量和, 制动电流 I_{sta} 是 I_1 , I_2 和 I_3 的标量和的 1/2, 其中, I_1 , I_2 和 I_3 分别表示某相对应绕组校正后的电流输入量。保护起动电流也是 0.5 p.u., a 段斜率设为 0.2, 当差动电流数值大于额定电流数值之后, b 段斜率定值设为 0.8。差动速断保护 (c 段) 门槛值设为 7.5 p.u.。

一旦差动保护电流数值达到差动速断保护门槛值, 7UT513 和 KBCH 130 都会瞬间出口跳闸, 附加闭锁功能无效。

2 比率差动保护的附加闭锁功能

2.1 7UT 513 的谐波闭锁

换流变网侧绕组出现励磁涌流和过激磁电流会产生较大的差动电流, 为了避免保护误动, 在出现励磁涌流和过激磁电流时, 差动保护功能必须被可

靠闭锁。傅立叶分解发现, 励磁涌流引起的差动电流包含明显的二次谐波分量, 而这在换流变内部短路故障引起的差动电流里一般是没的。在广州换流站, 7UT 513 装置的比率差动保护功能在二次谐波电流数值与基波电流数值的比值达到 15% 的门槛值后被闭锁。

此外, 7UT 513 装置还有 3 次、4 次和 5 次谐波闭锁功能, 不过这些闭锁功能在广州换流站没有投入使用。

如果谐波闭锁功能是简单的分相闭锁, 在换流变充电过程中, 任一相的二次谐波电流与基波电流的比值小于门槛值, 7UT 513 就仍有可能误动作。为了避免实际中诸如两相差动功能被闭锁而另一相未被闭锁引起保护误动作的情况, 广州站的 7UT 513 装置执行二次谐波“交叉闭锁”功能, 即一旦一相的二次谐波比值超过门槛值, 起动的闭锁功能对三相都有效。

2.2 KBCH 130 的间断角闭锁

换流变发生严重内部故障时, 测量 CT 会迅速饱和而产生二次谐波, 这种情况下采用二次谐波闭锁功的差动保护装置会有明显的延时动作现象。为了避免这种情况, 广州换流站的 KBCH 130 装置采用了波形识别技术来鉴别励磁涌流。

励磁涌流引起的差动电流波形在每个周期内有一段时间电流幅值非常小, 且基本保持不变, 这段时间就是励磁涌流的间断时间, 对应的角度就是涌流间断角。在广州换流站, 如果差动电流的间断时间经测算超过 1/4 的基波周期 (5 ms), KBCH 130 认为该差动电流是励磁涌流所引起, 对应相的比率差动保护被闭锁, 这就是间断角闭锁。

2.3 KBCH 130 的五次谐波闭锁功能

就广州换流站来说, 在正常双母联络运行情况下, 广北甲线或广北乙线突然跳闸, 或者母线联络开关 2012 突然跳开, 某一母线电压突然增加, 这时与该母线相连的换流变压器激磁电流会急剧增加, 可能导致差动保护误动。KBCH130 通过傅立叶分解获得差动电流的五次谐波分量, 当某相的 5 次谐波分量与基波分量的比值达到 50% 时, 该相的比率差动保护功能被闭锁 10 s。

3 案例分析

3.1 事件描述

2007 年 1 月 28 日 12:08, 在同期装置 PSD 运行异常的情况下, 广州换流站极 1 从备用状态操作到闭锁状态, 连接 220 kV 交流母线和换流变网侧绕组的断路器 2051 合闸, 换流变瞬间充电。几乎同时,

监视工作站事件记录显示“21T01+R2/87T_TRP”，同时暂态故障录波装置启动。接着，断路器 2051 断开，极 1 恢复至备用状态。现场检查极 1 换流变外观无异常，同期装置 PSD 表征“过电压或励磁涌流出现”的指示灯变红，KBCH 130 面板的“跳闸”指示灯变红，7UT513 没有任何跳闸指示信息。

察看暂态故障录波的波形，换流变网侧绕组的电流波形如图 3。其中 A 相和 B 相的电流波形均偏离了坐标轴中的时间轴即零水平线；三相电流波形都不是标准的正弦波形，且都出现了间断角；波形具备励磁涌流的典型特征。

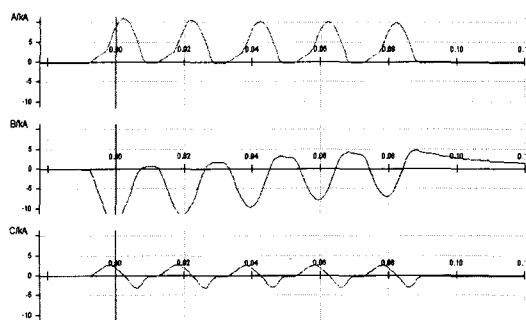


图 3 网侧绕组的电流波形

Fig.3 Current wave of the primary winding

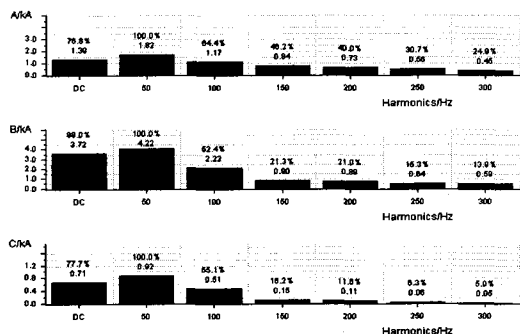


图 4 网侧绕组电流谐波分析柱形图

Fig. 4 Harmonic analysis to the primary winding current

3.2 7UT 513 的动作情况分析

观察换流变压器三相网侧绕组电流波形，发现涌流的最大瞬时幅值达到了 14 000 A，最大的可能电流有效值达到 9 900 A，9 900 A 与额定电流 2 538 A 的比值大于 0.5 而小于 7.5，因此，7UT513 的差动速断保护不可能起动而比率差动保护起动。

对录波起动 0 时刻的换流变压器三相网侧绕组电流波形进行谐波分析，其结果如柱形图 4 所示，A、B、C 三相网侧绕组电流都带有大量的直流分量和二次谐波分量，三相的二次谐波分量与对应基波分量比值分别是 64.4%、52.4% 和 55.1%。而此后的 90 ms 内，均有 2 相电流的二次谐波与基波的比值

大于 15%，因此，7UT513 的二次谐波闭锁功能准确起动，比率差动保护功能被闭锁，该装置可靠不动作。

3.3 KBCH 130 动作情况分析

由于 KBCH130 的门槛值与 7UT 513 的相同，由前面的分析可知，KBCH130 的差动速断保护不可能起动，而比率差动保护会起动，如果其附加闭锁功能不起动，该装置会出口跳闸。

3.3.1 最小间断角估值

有关统计数据表明，超高压大型换流变压器一般的额定工作磁场强度 $B_N=1.7\sim 1.8\text{ T}$ ，饱和磁场强度 $B_s=1.9\sim 2.0\text{ T}$ ，两者很接近，一般有 $B_s\approx 1.15 B_N$ ；又额定工作磁场强度对应额定磁通 Φ_N ，饱和磁场强度 B_s 对应饱和磁通 Φ_s ，铁芯截面积一定的情况下，磁通与磁场强度的比值是一个常数，故有 $\Phi_s\approx 1.15 \Phi_N$ 。经验表明，当工作磁场强度达到 $(1.3\sim 1.4) B_N$ 或者说磁通 Φ 达到 $(1.3\sim 1.4) \Phi_N$ 时，励磁电流的有效值等于换流变压器的额定电流值，即 $I_e=I_N$ ；而工作磁场强度不大于 B_N 或者说磁通 Φ 不大于 Φ_N 时，励磁电流 I_e 非常小，约为额定电流的 1%。

磁通是一个随时间变化的矢量，由文献[1]可知，空载单相换流变压器合闸时，铁芯磁通为

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_m \cos \alpha + \Phi_{sy} \quad (1)$$

式(1)中 $\Phi_m = U_m / \omega$ ，为对应于 U_m 的磁通峰值， $\Phi_m \cos(\omega t + \alpha)$ 称为稳态磁通， $(\Phi_m \cos \alpha + \Phi_{sy})$ 称为暂态磁通，当合闸电压为额定电压时， Φ_m 即 Φ_N 。换流变充电时出现的励磁涌流只流过励磁绕组，它的幅值大小跟合闸瞬间的电压初始相位角、换流变铁芯的剩磁等有关。文献[1]推导表明合闸时刻初始相角 α 为零度，且剩磁 Φ_{sy} 的方向与非周期分量 $\Phi_m \cos \alpha$ 的方向一致的情况下，合闸涌流出现的间断角 θ_j 最小。其表达式为：

$$\theta_{j,\min} = 2\arccos[\cos \alpha - (B_s - B_{sy}) / B_N] = 2\arccos[\cos \alpha - (\Phi_s - \Phi_{sy}) / \Phi_N] \quad (2)$$

考虑最恶劣的情况，假定取合闸初始相角 α 为 0° ，且 $\Phi_s = 1.15 \Phi_N$ ， $\Phi_{sy} = 0.9 \Phi_N$ ，那么根据式(2)，可以算得 $\theta_{j,\min}$ 为 $82\sim 84^\circ$ ，对应持续时间是 $4.5\sim 4.6\text{ ms}$ 。

广州换流站 KBCH 130 装置的间断角整定时间是 5 ms，对应的间断角定值是 90° ，考虑因每 0.5 ms 采样一次引起的测量误差，在间断角为 $80\sim 84^\circ$ 之间时，KBCH 130 有判定其为间断角的可能，但是不能判定其为间断角几率非常大。可见，极端恶劣情

况下, KBCH 130 确实存在不能识别涌流间断角的可能,也就存在间断角闭锁功能不能准确起动的可能。

3.3.2 用 SIGRA 4.21 观察间断角

用西门子公司的波形分析软件SIGRA 4.21放大网侧电压波形发现, B相合闸时刻刚好是B相电压的上升过零点,故障录波起动前的7.7 ms, A相、B相的网侧绕组开始出现励磁电流,而B相电流的变化率明显大于A相的电流变化率;录波起动的0时刻就是B相网侧绕组流过电流最大值的时刻,最大幅值约为14 000 A,录波起动后2.1 ms A相流过的电流达到最大值,最大幅值约为12 000 A, C相的最大电流幅值小于3 000 A,这些电流幅值对应的有效值与额定电流的比值都大于0.5,因此确定

KBCH 130 的比率差动保护会起动。

用 SIGRA 4.21 放大网侧绕组电流波形, 可以看到清晰的间断角拐点, 通过移动光标可以精确看到各拐点的时间和电流幅值。各相电流波形中每个间断角两端起始拐点和结束拐点的时间和电流幅值详细记录在表1。

从表1可以看到, A、C相励磁涌流各个周期的涌流间断时间是3 ms, 对应间断角为 54° 。B相涌流前两个周期的间断时间分别4 ms和4.2 ms, 对应间断角为 72° 和 75.6° , 这些涌流间断时间都小于4.5 ms, 而各相合闸涌流的间断时间实际上就是各相差动电流的间断时间。

表1 波形间断拐点记录

Tab.1 Record of waveform knee points

间断角		A 相	B 相	C 相
1	起始时间(ms)/ 电流幅值(A)	9/-250	8.2/456	9.5/-104
	结束时间(ms)/ 电流幅值(A)	12/-228	12.2/484	12.5/-83
	持续间断时间(ms)	3	4	3
2	起始时间(ms)/ 电流幅值(A)	29/-269	28.1/1550	29.5/-124
	结束时间(ms)/ 电流幅值(A)	32/-249	32.3/1520	32.5/-104
	持续间断时间(ms)	3	4.2	3
3	起始时间(ms)/ 电流幅值(A)	49/-269	46.3/2370	49.5/-124
	结束时间(ms)/ 电流幅值(A)	52/-245	52.3/2760	52.5/-124
	持续间断时间(ms)	3	6	3
4	起始时间(ms)/ 电流幅值(A)	69/-248	66.2/3610	69.5/-124
	结束时间(ms)/ 电流幅值(A)	72/-248	72.2/3510	72.5/-124
	持续间断时间(ms)	3	6	3

因此, 此次换流变充电产生的励磁涌流, 其引起的差动电流的涌流间断时间小于KBCH 130 整定的间断时间, 也即实际的间断角小于整定的间断角, 间断角不能被识别, 间断角闭锁功能未起动。

可见, KBCH 130 的比率差动保护由于达到定值起动, 而相应的间断角闭锁功能未准确起动, 故KBCH 130 出口跳闸。

4 结束语

对7UT 513 和KBCH 130的差动保护特性以及它们针对励磁涌流和过激磁电流的附加闭锁功能进行分析, 并利用最小间断角估值和涌流波形分析的办法对2007年1月28日广州换流站的极1换流变压器充电过程中保护动作情况进行分析, 结果表明KBCH 130 用于识别间断角的间断时间整定值比涌流引起的差动电流间断时间长, 其间断角闭锁功能未能准确起动, 导致其差动保护功能未被可靠闭

锁而出口跳闸。这就是KBCH130 误动的原因。

基于以上的理由和目前广州换流站的实际, 参照大型变压器涌流间断角的有关文献, 在同期装置PSD 和换流变保护装置不改造的情况下, 建议将识别涌流间断的时间定值调小, 设为3~4 ms (对应的间断角定值为 54° ~ 72°), 并增加波宽判据或电压判据做间断角闭锁功能的辅助判据。

实际的运行经验和网侧绕组电流的谐波分析都表明, 换流变充电等情况下, 励磁电流的三次谐波含量较大, 建议投入7UT 513 装置的三次谐波闭锁功能。

此外, 建议尽快使用采样频率更高的涌流识别算法更科学的差动保护装置, 以提高换流变保护的可靠性和灵敏性; 为避免励磁涌流对换流变的伤害和有效防止差动保护误动, 需要有效抑制励磁涌流, 因此, 可靠的同期装置PSD 应该尽快投入运行。

(下转第107页 continued on page 107)

(4) 差动保护灵敏度越高,动作速度越快,对变压器损坏可能性越小或容易修复,文献[5]认为更轻微的故障保护若不能立即动作也不会有严重后果的看法值得商榷。

(5) 由于波形对称原理是较新原理的差动保护,考虑到波形对称度判据的计算保守、苛刻,加之实际故障波形有畸变(存在直流分量和谐波分量),导致判断速度慢,影响保护出口。乙保护在二次谐波高于定值和波形不对称两种情况时,采用 5 ms 延时再开放的处理办法是导致在较短开放时间内差动未能出口的因素之一。

参考文献

- [1] 雷明,刘峰,康林贤,等.陕西电网“8.14”故障 330kV 主变压器差动保护动作分析[J].陕西电力,2008,36(7):30-33.
LEI Ming, LIU Feng, KANG Lin-xian, et al. 330kV Main Transformer Differential Relay Operation Analysis of 8.14 Fault in Shaanxi Grids [J]. Shaanxi Electric Power, 2008, 36(7): 30-33.
- [2] 王世阁,钟洪璧.电力变压器故障分析与技术改进[M].北京:中国电力出版社,2004.
WANG Shi-ge, ZHONG Hong-bi. Power Transformer Fault Analysis and Technical Improvement[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [3] 国电南京自动化股份有限公司.WBZ-500H 变压器保护装置说明书[Z].2006

Guodian Nanjing Automation Co., Ltd. WBZ-500H Transformer Protection Device Technical Instruction Manual[Z]. 2006.

- [4] 国电南京自动化股份有限公司.PST-1200 系列数字式变压器保护装置说明书 [Z].2006.
Guodian Nanjing Automation Co.Ltd.PST-1200 Series Digital Transformer Protection Device Technical Instruction Manual [Z]. 2006.
- [5] 朱声石.变压器轻微匝间故障的保护[J].电力自动化设备,1999,19(1):23-27.
ZHU Sheng-shi. Transformer Protection for Low Percentage Interturn Faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(1): 23-27.
- [6] IEC 76-5 (1976), Power Transformer, Part 5: Ability to Withstand Short Circuit[S].
- [7] GB-1094.6-2003, 电力变压器第 5 部分: 承受短路的能力[S].
GB-1094.6-2003, Power Transformer Part 5: Ability to Withstand Short Circuit[S].

收稿日期: 2008-06-26 修回日期: 2008-07-15

作者简介:

雷明(1965-),男,高级工程师,主要从事电力系统继电保护整定计算和运行管理工作; E-mail: leiming@snepc.com

刘峰(1966-),男,高级工程师,主要从事继电保护管理工作;

康林贤(1964-),男,高级工程师,主要从事继电保护管理工作。

(上接第 96 页 continued from page 96)

参考文献

- [1] 张志竟,黄玉铮.电力系统继电保护原理与运行分析[M].北京:水利电力出版社,1995.
ZHANG Zhi-jing, HUANG Yu-zheng. Power System Relay Principle and Operation Analysis[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.
- [2] ZONG Hong-liang, JIN Hua-feng, ZHU Zheng-fei, et al. Transformer Inrush Detected By the Variation of Magnetizing Imedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 91-94.
- [3] CHEN Jian, LI Wei. Characteristic of Transformer Magnetizing Inrush Current and Its Practical Application[J]. Hunan Electicity, 2005, 25(4): 4-5.
- [4] ZHU Ya-ming, ZHENG Yu-ping, YE Feng, et al. Performance and Digital Realization of Transformer Differential Relay Based on Dead Angle Philosophy[J].

Automation of Electric Power System, 1996, 20(11).

- [5] MA Jing, XU Yan, WANG Zengping, et al. A Novel Adaptive Scheme of Discrimination Between Internal Faults and Inrush Currents of Transformer Using Mathematical.

收稿日期: 2008-01-24; 修回日期: 2008-02-28

作者简介:

李书勇(1979-),男,硕士,工程师,从事直流输电系统的运行维护工作,研究方向为高压直流输电和电力信息处理; E-mail: oliver0057@tom.com

张海凤(1976-),男,工程师,从事高压直流输电系统的技术管理工作;

张鹏(1954-),男,高级工程师,从事高压直流输电系统的技术管理工作。